

УДК 621.791.72:621.791.052:620.17

И. В. КАСЬЯНЕНКО**ОСОБЕННОСТИ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МЕТАЛЛА
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ**

В работе на основании проведенной оценки технологических, конструкционных и эксплуатационных факторов, которые влияют на надежность сварных соединений трубопроводов, на виды и скорость развития возникающих в них дефектов, было установлено, что для оценки надежности соединений трубопроводов после длительной эксплуатации недостаточно проведения стандартных исследований механических свойств сварных швов. Предложено в качестве критерия оценки надежности сварных соединений трубопроводов использовать такую характеристику дефектов, как их сопротивление разрушениям.

Ключевые слова: дефекты, сварные соединения, трубопроводы, надежность, сопротивление, повреждаемость.

I. В. КАСЬЯНЕНКО**ОСОБЛИВОСТІ ПОШКОДЖУВАНOSTІ МЕТАЛУ
ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТРУБОПРОВОДІВ**

В роботі на підставі проведеної оцінки технологічних, конструкційних і експлуатаційних факторів, які впливають на надійність зварних з'єднань трубопроводів, на види і швидкість розвитку дефектів що виникають в них, було встановлено, що для оцінки надійності з'єднань трубопроводів після тривалої експлуатації недостатньо проведення стандартних досліджень механічних властивостей зварних швів. Запропоновано в якості критерію оцінки надійності зварних з'єднань трубопроводів використовувати таку характеристику дефектів, як їх опір руйнуванню.

Ключові слова: дефекти, зварні з'єднання, трубопроводи, надійність, опір, пошкоджуваність.

I. V. KASYANENKO**FEATURES OF DAMAGE TO METAL OF WELDED PIPELINES**

The aim of the work is to establish the causes of defects in welded joints of pipelines and factors affecting the size and speed of their development. In the work, an assessment was made of the technological, structural and operational factors affecting the reliability of welded joints of pipelines, the types and speed of development of defects arising in them. It was found that to assess the reliability of pipeline connections after long-term operation, it is not enough to conduct standard studies of the mechanical properties of welds. It is proposed to use such a characteristic of defects as fracture resistance as a criterion for assessing the reliability of welded joints in pipelines. It was established that the damageability of the welded joints of pipelines and the assessment of their defects, in general, depends on the joint manifestation of technological, structural and operational factors. The presented research results make it possible to conclude that to evaluate the reliability of welded joints of pipelines after long-term operation, it is not enough to conduct standard studies of mechanical properties. Criteria for assessing the reliability of pipelines should be the characteristics of defects or the value of resistance to fracture of welded joints.

Key words: defects, welded joints, pipelines, reliability, resistance, damageability.

Введение. В мировой практике передача нефти, газа, теплоносителей и т.д. выполняется в основном по транзитным трубопроводам.

Протяженность трубопроводов в разных странах постоянно увеличивается. Одновременно осуществляется их модернизация и техническое перевооружение, внедряется современное сопутствующее оборудование, новые средства управления потоками рабочего тела, новые системы контроля, внедряются более совершенные технологии обслуживания и ремонта. Одним из важных направлений повышения надежности новых и вновь вводимых трубопроводов является совершенствование выполнения сварных соединений и контроля их качества. Такое внимание и повышенный контроль состояния сварных швов определяется достаточно частыми дефектами сварки, которые, согласно собранному известным статистическим данным, были установлены как во время испытаний, так и в ходе эксплуатации [1].

Для обеспечения прочности сварного соединения участков трубопровода необходимо не допускать и/или своевременно выявлять явные и образующиеся дефекты сварных соединений на этапе их выполнения

даже в полном соответствии утвержденным технологическим процессам [2, 3].

Дефекты сварных соединений трубопроводов имеют отличительные особенности, на основании которых можно выполнить их классификацию по степени влияния на работоспособность, по причинам и местам появления, [4–7]:

- дефекты, объединенные местом зарождения;
- дефекты, объединенные одинаковыми причинами возникновения;
- дефекты, объединенные тем, что для их обнаружения использовались одинаковые системами контроля;
- классификация по величине разрушенной зоны: макро– и микродефекты.

Такое разнообразие и высокая вероятность появления дефектов в местах соединения трубопроводов, в сварных швах, определяет необходимость непрерывного контроля и совершенствования способов диагностики их состояния. Это, в свою очередь, определяет актуальность проведения исследований причин появления и оценки величины и вида дефектов сварных соединений трубопроводов, особенно

находящихся в длительной эксплуатации, т.е. в состоянии физического износа.

Цель работы. Целью работы является установление причин появления дефектов в сварных соединениях трубопроводов и факторов, влияющих на величину и скорость их развития.

Изложение основного материала. Оценку дефектов сварных соединений трубопроводов производят на основе методов контроля, которые включают:

- внешний осмотр по ГОСТ 3242-79;
- люминесцентную и цветную дефектоскопию в соответствии с ГОСТ 18442-80;
- выполнение испытаний на твердость по ГОСТ 22761-77;
- применение экспресс-анализа химического состава шва;
- исследование содержания ферритной фазы в швах по ГОСТ 2246-70;
- технологическую пробу контролируемого сварного соединения по ГОСТ 3242-79;
- исследование макроструктуры и металлографии по ГОСТ 3242-79;
- процесс определения склонности полученных швов к межкристаллитной коррозии в соответствии с ГОСТ 6032-2003;
- капиллярный метод, который предназначен для определения герметичности сварного шва;
- определение плотности на основании пневматического испытания, применение вакуум-метода или метода химических реакций по ГОСТ 3242-79;
- методы гидравлических испытаний;
- процесс просвечивания радиоактивным источником сварных соединений в соответствии с ГОСТ 7512-82;
- методы магнитографического контроля по ГОСТ 25225-82;
- ультразвуковой метод контроля в соответствии с ГОСТ 14782-86.

Последние три метода нашли широкое применение в последние десятилетия. Однако в условиях мирового экономического кризиса чаще стали использовать другие перечисленные выше методы контроля сварных соединений трубопроводов, которые являются более дешевыми по сравнению с тремя последними.

Для ответственных трубопроводов в последние годы стали использовать и способы, которые требуют применения достаточно дорогого оборудования. В частности, начали применять внутритрубные самоходные радиографические установки, позволяющие диагностировать сварные соединения из центра трубы за одну экспозицию.

На основании визуального осмотра дефекты сварных соединений трубопроводов, которые приводят к последующим разрушениям, можно классифицировать как [7, 8]:

- с наличием подрезов;
- с образующимися наплывами;

- дефекты, в которых возникают разрушения внешних и внутренних швов при смещении;
- с появляющимися неравномерностями по высоте и ширине шва вдоль его длины;
- с возникающими порами по глубине шва;
- дефекты, возникающие от шлаковых включений.

Такие дефекты проявляются при изготовлении и при монтаже сварных соединений трубопроводов. Эскизы возможных формирований дефектов приведены на рис. 1.

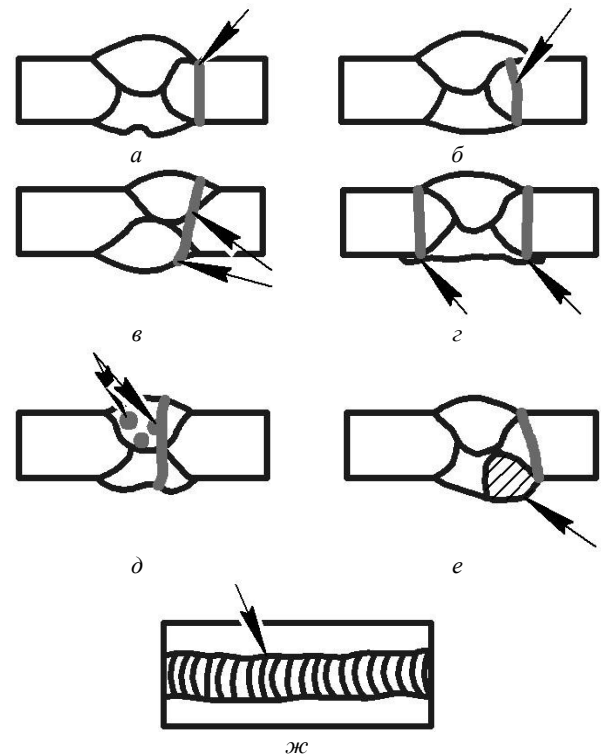


Рис. 1 – Схемы формирований дефектов сварных соединений трубопроводов, приводящие к разрушениям:
а – с возникающими подрезами; б – с возникающими наплывами; в – с возникающим расхождением соединений при смещении; г – возникающие при наличии остаточных напряжений из-за неполного снятия усилий; д – дефекты от внутренних пор или шлаковых включений; е – от заводских дефектов из-за нарушений технологии; ж – дефекты, вызванные неравномерностью выполнения высоты и ширины шва вдоль его длины

Дефекты в сварных швах также могут быть вызваны неравномерностью напряжений в них из-за разрушения массива трубопровода или разрушения шва при его выполнении по его длине. Таким разрушениям характерно локальное и лавинное сосредоточение. Согласно нашим исследованиям, четкой классификации появления и развития дефектов в сварных швах из-за общего разрушения трубопровода и в продольных сварных швах нет. Но исследования ведутся, т.к. возникающие при этом проблемы весьма серьезны.

Для исследования экспериментально был создан дефект сварного шва магистрального газопровода из стали 14Г2САФ размером 1220х11 м, который привел

к его разрушению на протяженности 133 м [8]. Напряжение разрушения было создано по программе пневмоиспытаний путем создания избыточного давления в 6,1 МПа. Результаты исследований приведены на рис. 2.

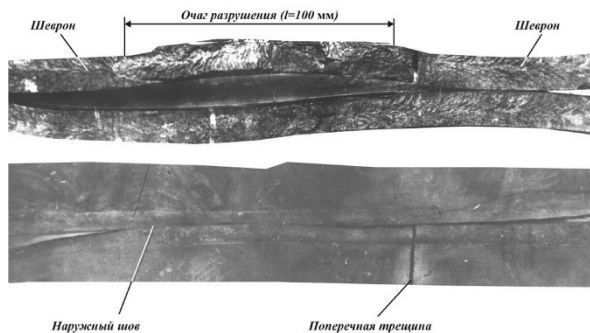


Рис. 2 – Пример формирования и развития очага разрушения в сварном шве магистрального газопровода размером 1220x11 м при пневмоиспытании ($P=6,1$ МПа)

Результаты лавинного разрушения трубопровода протяженностью 373 м (размер трубопровода 1220x12 м) приведен на рис. 3 [8].

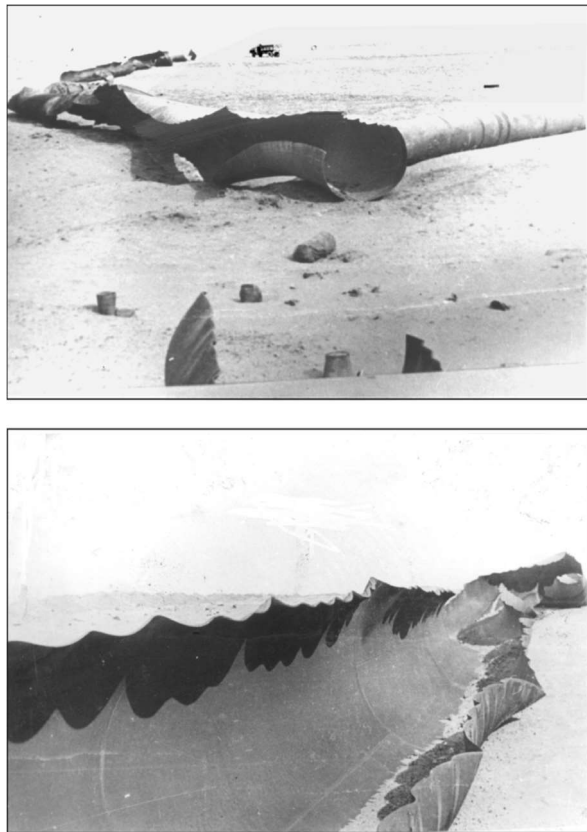


Рис. 3 – Пример результатов лавинного разрушения трубопровода размером 1220x12 м (Сталь 17Г1С)

В результате исследований (исследование фото дефекта по длине сварного шва, рис. 2) установлено, что при вязком (пластическом) разрушении шевронный узор практически не образуется.

Известно, что в зоне сварных соединений происходит изменение структуры в близких ко шву зонах, что приводит к снижению их пластичности и устойчивости к внешним нагрузкам. Однако опыт эксплуатации трубопроводов показал, что специальных приемов для обеспечения равной прочности и пластичности сварного соединения и основного металла трубопровода выполнять не надо. Но запас прочности в созданном сварном соединении должен быть достаточным, чтобы без последствий выдерживать максимальное давление, определенное условиями эксплуатации трубопровода. Т.е. напряжение, которое без следов пластической деформации, без формирования дефектных зон в сварном шве допустимо при работе с максимальным давлением:

$$\sigma_{\epsilon}^c = K^c \sigma_{\epsilon}, \quad (1)$$

где σ_{ϵ}^c и σ_{ϵ} – нормальные напряжения в сварном соединении трубопровода и в массиве металла трубопровода соответственно;

K^c – коэффициент возможного снижения прочности металла в зоне сварного соединения трубопровода по сравнению с остальным металлом трубопровода, (индекс «с» указывает на принадлежность к сварному соединению).

Необходимо отметить, что σ_{ϵ}^c представляет собой не просто напряжение текучести материала, а определяет агрегатную прочность сварного шва в зоне соединения элементов трубопровода.

В качестве примера для понимания указанных в (1) величин и коэффициента, рассмотрим режим работы трубопровода с нагрузкой, которая обеспечивает величину внутреннего давления равного половине максимально допустимого ($F_{\max} = 0,5$), [8].

Тогда для этого случая можно записать:

$$F_{\max} = A_0 \frac{2\sigma_{\epsilon}^c(\epsilon_{\epsilon}^c)}{\sqrt{3}} = A_0 \frac{2\sigma_{\epsilon}(\epsilon_{\epsilon})}{\sqrt{3}}, \quad (2)$$

где A_0 – площадь зоны сварного соединения трубопровода;

ϵ_{ϵ}^c и ϵ_{ϵ} – относительные прочности сварного соединения трубопровода и самого металла трубопровода (соответственно). Учитывая условия выбранного режима:

$$\epsilon_{\epsilon}^c = \epsilon_{\epsilon m}^{\exp(3m)^c}, \quad \epsilon_{\epsilon} = \epsilon_{\epsilon m}^{\exp(3m)}, \quad (3)$$

Если пренебречь деформацией сварного соединения трубопровода, что вполне допустимо [6,8], из (2) можно получить следующее равенство:

$$\sigma_{\epsilon}^c \frac{2\epsilon_{\epsilon}^c}{\sqrt{3}} = \sigma_{\epsilon} \frac{2\exp(\epsilon_{\epsilon}/2)}{\sqrt{3}}, \quad (4)$$

Тогда, согласно (1) и (4) получаем выражение для коэффициента K^c :

$$K^c = \left(\frac{1}{2}\right)^{\sigma_g} \exp\left(\frac{\varepsilon_g}{2}\right). \quad (5)$$

На рис. 4 представлена графическая зависимость возможного ослабления существующей прочности сварного соединения трубопровода от его относительной прочности. Расчет выполнен для различных режимов работы трубопровода с нагрузкой, которая обеспечивает величину внутреннего давления в разных долях от максимально допустимого F_{\max} , по алгоритму (5).

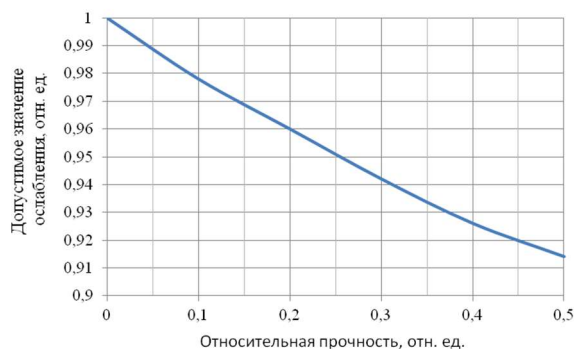


Рис. 4 – Графическая зависимость допустимого значения возможного ослабления существующей прочности сварного соединения трубопровода от его относительной прочности

Обсуждение результатов. Из полученной графической зависимости (рис. 4) можно сделать вывод, что значения коэффициента K_g^c в разных режимах нагрузки (при разном избыточном внутреннем давлении) незначительно отличаются друг от друга и от единицы. Но они позволяют оценить величину и установить допустимую зону ослабления механической прочности отдельных зон сварных соединений трубопровода с точки зрения сохранения их прочности. Установлено, что допустимое значение возможного ослабления существующей прочности сварного соединения трубопровода будет тем больше, чем выше пластичность самого материала.

Возможные разрушения трубопроводов происходит в ослабленной области. Однако при максимальном давлении в трубопроводе разрушение будет расширяться лавинообразно, независимо от места начала формирования дефекта и ослабленной зоны. Последующее ослабление прочности сварного соединения трубопровода при условии $K_g^c \leq K^c$ приведет к разрушению по растущей ветви диаграммы давление-деформация.

Выводы. Установлено, что повреждаемость сварных соединений трубопроводов и оценка их дефектов, в отдельности, и надежности, в целом, зависит от совместного проявления технологического, конструкционного и эксплуатационного факторов. Поэтому актуальным является применение более дешевых методов контроля дефектов, поскольку это

упрощает процесс оценки дефектов сварных соединений трубопроводов.

Также следует отметить, что для оценки надежности сварных соединений трубопроводов представляется целесообразным выполнять изучение зависимости повреждаемости сварных соединений от появления дефектов, а также от их структурного состояния, что необходимо для продления ресурса наработки сварных соединений.

Представленные результаты исследований дают возможность сделать вывод, что для оценки надежности сварных соединений трубопроводов после длительной эксплуатации недостаточно проведения стандартных исследований механических свойств. Критериями оценки надежности трубопроводов должны быть характеристики дефектов или величины сопротивления разрушению сварных соединений.

Список литературы

1. API: Welding of pipelines and related facilities API 1104 20th Edition Incorporating 2007, Amendments Washington: American Petroleum Institute, 2007. 12-14 pp.
2. Huising OJC: Theory and practice: implementation of the revised EPRG Tier-2 guidelines Paper S16-01. In: 6th International Pipeline Technology Conference, Ostende, October 6-9 2013. Great Southern Press.
3. Касьяненко И.В. Особенности повреждаемости длительно эксплуатируемых сварных соединений паропроводов // Энергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХПІ». 2019. №3
4. BSI: Gas supply systems – Welding steel pipework – functional requirements BS EN 12732 London: British Standards Institution, 2000. 34 p
5. Standards Australia: Pipelines – Gas and liquid petroleum Part 2: Welding AS 2885.2-2007 Homebush, New South Wales: Standards Australia, 2007. 57 p.
6. Andrews RM and Morgan LL: Integration of automated ultrasonic testing and engineering critical assessment for pipeline girth weld defect acceptance. In: Fourth International Conference on Pipeline Technology, Ostende, May 9-13 2004. Scientific Surveys: Beaconsfield. pp. 655-667.
7. Knauf G and Hopkins P: The EPRG guidelines on the assessment of defects in transmission pipeline girth welds. 3R International 1996, 35(10/11), p. 620-4.
8. Ланчаков Г.А., Зорин Е.Е., Пашков, Ю.И., Степаненко А.И. Работоспособность трубопроводов: в 3-х ч. // Ч. 2. Сопротивляемость разрушению. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2001. – 350 с.

References (transliterated)

1. API: Welding of pipelines and related facilities API 1104 20th Edition Incorporating 2007, Amendments Washington: American Petroleum Institute, 2007. 12-14 pp.
2. Huising OJC: Theory and practice: implementation of the revised EPRG Tier-2 guidelines Paper S16-01. In: 6th International Pipeline Technology Conference, Ostende, October 6-9 2013. Great Southern Press.
3. Kasyanenko I.V. Specific features of the damageability of the welded joints of steam pipelines that have been in service for a long time// Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannya. Visnyk NTU «KHPi». 2019. No 3.
4. BSI: Gas supply systems – Welding steel pipework – functional requirements BS EN 12732 London: British Standards Institution, 2000. 34 p.
5. Standards Australia: Pipelines – Gas and liquid petroleum Part 2: Welding AS 2885.2-2007 Homebush, New South Wales: Standards Australia, 2007. 57 p.
6. Andrews RM and Morgan LL: Integration of automated ultrasonic testing and engineering critical assessment for pipeline girth weld defect acceptance. In: Fourth International Conference on Pipeline

- Technology, Ostende, May 9-13 2004. Scientific Surveys: Beaconsfield, pp. 655–667.
7. Knauf G and Hopkins P: The EPRG guidelines on the assessment of defects in transmission pipeline girth welds. 3R International 1996, 35(10/11), p. 620–4.
8. Lanchakov G.A., Zorin Ye.Ye., Pashkov, YU.I., Stepanenko A.I. Rabotosposobnost' truboprovodov: v 3-kh ch. // CH. 2. Soprotivlyayemost' razrusheniyu. – Moscow: Nedra-Biznestsentr, 2001. – 350 p.

Поступила (received) 15.09.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Касьяненко Игорь Викторович (Касьяненко Ігор Вікторович, Kasyanenko Igor Victorovich) – аспірант, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспірант кафедри сварки г. Харьков, Украина; e-mail: igorkasyanen@gmail.com.